

論文 コンクリート構造物のアルカリシリカ反応に及ぼす電気防食の影響

石井 浩司*¹・鳥居 和之*²・川村 満紀*³・松本 一昭*⁴

要旨: 電気防食がコンクリート構造物のアルカリシリカ反応に及ぼす影響を検討することを主目的とし、電気防食を施した大型コンクリート部材を製作し長期間屋外に暴露した。コンクリートの水/セメント比、アルカリ量を試験要因として、コンクリート試験体に発生したひびわれ観察および膨張量を測定した結果、電気防食の適用によりコンクリートのアルカリシリカ反応は促進されることが明らかになった。さらに、コンクリート中の鋼材の復極試験からアルカリシリカ反応が原因によると考えられる電気化学的特性の変化が認められた。

キーワード: アルカリシリカ反応、電気防食、膨張量、電気化学的特性

1. はじめに

海水作用や融雪・融氷剤の散布による鋼材腐食が原因で損傷を受けたコンクリート構造物の維持管理および補修・補強が重要な課題となっており、抜本的な対策の一つとしてコンクリート中の鋼材の腐食を電気化学的に抑制させる電気防食の適用が注目を集めている。一方、安山岩や流紋岩などの反応性骨材を使用したコンクリート構造物において、コンクリートの配合条件と構造物の置かれている環境条件の組み合わせによりアルカリシリカ反応によるひびわれなどの損傷が生じることが報告されている〔1〕。

電気防食はコンクリート表面に取り付けたアノードからカソードとなるコンクリート中の鋼材へ微小電流を印加する方法で、電解質となるコンクリート中では印加された電流により Na^+ イオンや K^+ イオンのアルカリイオンがカソードとなる鋼材に移動し集積すると報告されている〔2〕。この報告は反応性骨材が使用されているコンクリート構造物において、アルカリシリカ反応による損傷が認められない場合でも電気防食の適用による鋼材付近のコンクリート中のアルカリイオン濃度の増加が原因で新たにアルカリシリカ反応による損傷が生じる可能性を示唆しており、第10回AAR国際会議における主要テーマの一つとして取り上げられている。直流電流によるアルカリシリカ反応の促進効果に関して、C. L. Pageら〔3〕や黒田ら〔4〕は小さな試験体を用い室内試験からコンクリートのアルカリシリカ反応がカソード付近で促進されることを報告しているが、自然環境下に置かれたコンクリート部材を用い、電気防食の影響が実証された事例はない。

そこで本研究は、反応性骨材を使用した大型コンクリート部材に電気防食を施し屋外自然環境下に暴露するとともに、コンクリートの膨張挙動および鋼材の電気化学的特性の変化を経時的に測定することにより、電気防食がコンクリートのアルカリシリカ反応に及ぼす影響を検討することを目的とするものである。

* 1 (株)ピー・エス技術研究所研究員、工修(正会員)

* 2 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科、工博(正会員)

* 3 金沢大学教授 工学部土木建設工学科、工博(正会員)

* 4 (株)ピー・エス北陸支店課長

2. 実験概要

2. 1 使用材料

使用したセメントは普通ポルトランド（等価 Na_2O 量：0.75%）と早強ポルトランドセメント（等価 Na_2O 量：0.58%）である。コンクリートに使用した骨材は、細骨材として非反応性の川砂（富山県早月川産）を使用し、粗骨材として非反応性の砕石（富山県早月川産）と主たる反応性鉱物として火山ガラスを含有する黒崎安山岩砕石（石川県能登半島産）を重量比で1：1に混合し使用した。黒崎安山岩砕石のアルカリ反応試験（化学法）の結果は $S_c = 2.28 \text{ mmol/l}$ 、 $R_c = 1.31 \text{ mmol/l}$ である。コンクリートの配合は橋梁に使用されている鉄筋コンクリート部材（以下RC配合とする）およびプレストレストコンクリート部材（以下PC配合とする）の代表的なものであり、表-1に使用した配合を示す。

表-1 コンクリートの配合

配合種類	セメント種類	スランブ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	W/C (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
						セメント	水	細骨材	粗骨材	減水剤
RC配合	普通ポルトランド	8±2	2±1	42	53	308	164	784	1125	—
PC配合	早強ポルトランド	8±2	2±1	37	35	440	155	650	1174	3.96

RC配合およびPC配合において、アルカリ添加とアルカリ無添加の2種類のコンクリート試験体を製作した。アルカリ添加の試験体は NaOH を練り混ぜ水に混入し 2.4 kg/m^3 のアルカリを添加した。また、アルカリを添加したRC配合試験体において、底面を除いた全面をエポキシ樹脂塗料を用いて塗装し、アルカリシリカ反応の抑制効果についても検討を加えた。

2. 2 試験体の形状および暴露場所

製作した試験体は、表-1の配合を用いた鉄筋コンクリート部材であり、図-1に概要を示す。施工した電気防食システムは外部電源を用いた導電性塗料方式とし、試験体の底面のみ施工した。コンクリートの膨張量測定に関して、片側側面3箇所、両側面にコンタクトゲージを取り付けた（側面が位置する方向から東側側面および西側側面とした）。電流の影響を把握しやすくするため図-2に示すように、試験体の側面1箇所につきアノードからの距離を要因としてコンタクトゲージを取り付け、コンクリートの膨張量は側面3箇所の平均値を代表値とした。電気防食を施した試験体に印加した電流密度は、 50 mA/m^2 （コンクリート表面積）である。

試験体は平成5年9月に製作した後、材令28日で工場内で屋外暴露するとともに電流を印加した。平成6年6月に金沢大学工学部の屋上に移設し、コンクリートのひびわれおよび膨張量の測定を定期的に行った。なお、暴露に際し試験体に施したアノードが直接日光にさらされるように、試験体の上下を逆にして設

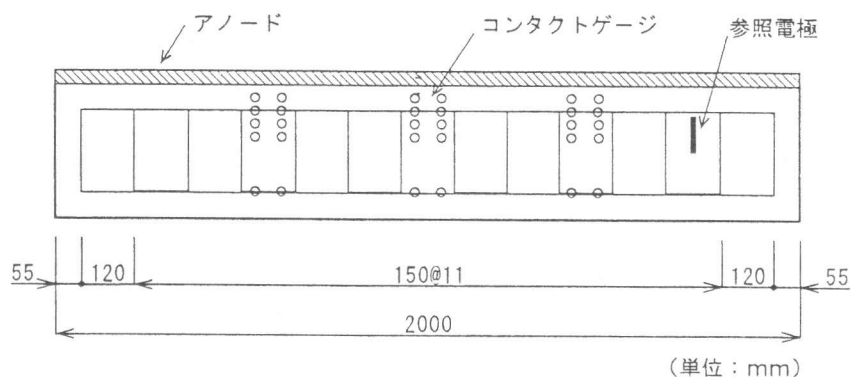


図-1 試験体の概要

置した。また、試験体の中に埋設した参照電極を用いて鉄筋の電気化学的特性の変化についても同時に検討した。

3. 実験結果および考察

3. 1 コンクリートのひびわれ状況

電気防食を施したRC配合試験体およびPC配合試験体に発生したひびわれ状況（暴露1.5年）を図-3および図-4に示す。アルカリを添加しないRC配合試験体において、電流を印加しない場合にはひびわれは全く認められなかったが、電流を印加した場合には暴露1年目の夏に試験体の上部および下部に幅0.05mm以下の微細なひびわれが認められた。アルカリを添加したRC

配合試験体において、電流を印加しない場合にはアルカリの添加が原因でアルカリシリカ反応が促進され、試験体の下部に幅0.1mm程度、長さ5~10cm程度のひびわれが等間隔に認められ、中央部には網の目状のひびわれの発達が顕著であった。電流を印加した場合には上部から中央部にかけてのひびわれがさらに増加する傾向にあった。一方、アルカリを添加しないPC配合試験体において、電流を印加しない場合には全くひびわれが認められなかったが、電流を印加した場合には暴露2年目の夏にひびわれが認められた。アルカリを添加したPC配合試験体において、電流を印加した場合にはRC配合試験体の場合と同様に試験体の上部から中央部にかけてのひびわれの発達が顕著であった。しかし、アルカリを添加したPC配合試験体のひびわれはRC配合試験体と比較して全体的に微細であり、RC配合試験体に認められたような試験体の下部に発生したひびわれは認められなかった。

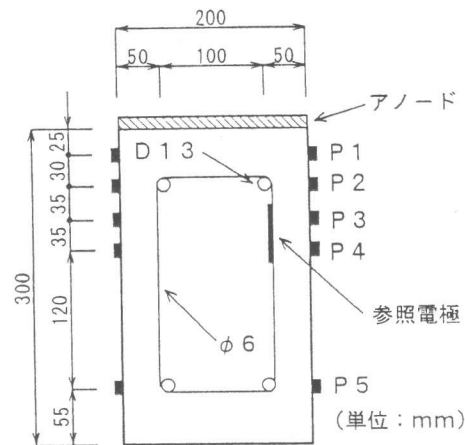


図-2 試験体の横断面図

(a) アルカリ無添加

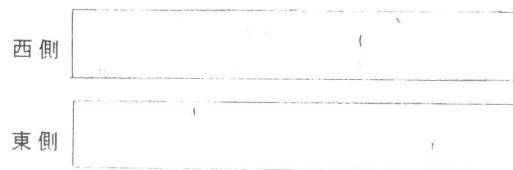


(b) アルカリ添加



図-3 電流を印加したRC配合試験体のひびわれ状況

(a) アルカリ無添加



(b) アルカリ添加

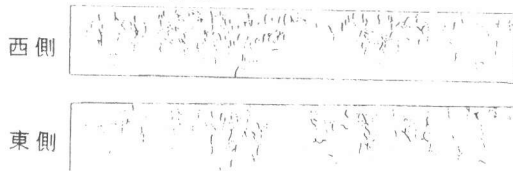


図-4 電流を印加したPC配合試験体のひびわれ状況

3. 2 コンクリートの膨張量

(1) 電気防食の影響

アルカリを添加しないPC配合試験体において、電流を印加しない場合と電流を印加した場合の膨張量を図-5に示す。電流を印加しない場合には西側側面において暴露1年目の夏に0.1%程度の膨張量を示す測定個所があり、暴露2年目の夏にさらに膨張する傾向にあった。季節変動

による階段状の膨張挙動を示していた。一方、電流を印加した場合には電流を印加しない場合と同様な膨張傾向を示しているが、暴露2.5年程度の東側側面の膨張量は0.2%と電流を印加しない場合と比較して大きくなる傾向を示していた。しかし、測点5 (P5)の膨張量は0.05%以下と膨張の傾向は認められなかった。この原因として、電流を印加した場合には印

加した電流のほとんどが測点2 (P2) 付近の鉄筋に流入し、測点5 付近の鉄筋にはほとんど流入しないことによるものと推定される。電流を印加した場合には試験体の上部から中央部にかけての膨張量が大きくなる傾向にあること、および、ひびわれの観察結果などを考慮すると電流の印加によるアルカリの鉄筋付近への移動によりアルカリシリカ反応が促進された可能性が高いと推定された。

(2) RC 配合とPC 配合

アルカリを添加したRC 配合試験体とPC 配合試験体に電流を印加した場合の膨張量を図-6 に示す。RC 配合試験体の場合には西側側面において暴露1年目の夏の膨張量が0.15%と大きく、暴露2年目の夏には膨張の傾向は認められなかった。一方、PC 配合試験体の場合には暴露1年目の夏の膨張は0.1%とRC 配合試験体と比較して小さい傾向にあった。また、暴露2年目の夏にはRC 配合試験体と相違し顕著に膨張する傾向にあった。RC 配合試験体とPC 配合試験体の膨張挙動の相違の原因に関して、RC 配合コンクリートとPC 配合コンクリートの組織構造の相違が原因で、屋外での乾湿繰り返しによるコンクリート中のアルカリの溶出挙動が相違するなどが考えられる。

(3) エポキシ樹脂塗装による効果

アルカリを添加したRC 配合試験体に電流を印加した場合の膨張量を図-7 に示す。暴露1年目の夏で西側側面において0.15%の膨張量を示しており、東側側面においては暴露2年目の夏にも膨張する傾向が認められた。図-6 (a) に示す同配合でエポキシ樹脂塗装しない試験体と比較すると、エポキシ樹脂塗装による外部環境からの水分の遮断によるアルカリシリカ反応の抑制効果は認められなかった。試験体へのエポキシ樹脂塗装が材令28日で行ったことにも起因

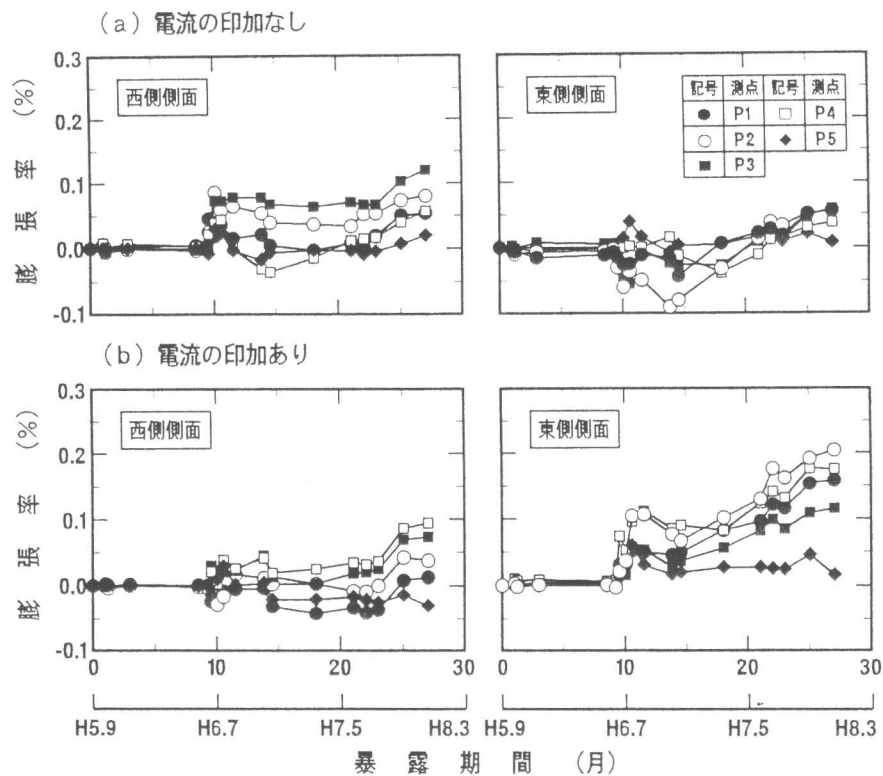


図-5 電流の印加の有無とコンクリートの膨張量
(アルカリ無添加PC配合)

するが、コンクリートの中に存在する水分でアルカリシリカ反応が生じる可能性は高いと推定された。さらに、暴露2年目の夏の膨張挙動に関して、エポキシ樹脂塗装することによりコンクリートの中からのアルカリの溶出が妨げられたことに起因するものと推定された。

3. 3 電気化学的特性の変化

暴露期間中、定期的に行った復極試験の結果を図-8に示す。本図に示した結果は、いずれも夏期に測定したものである。アルカリを添加しないP C配合試験体においては、通電遮断直後の電位および復極性状は暴露当初の性状とほぼ同様な傾向を示していた。しかし、アルカリを

添加したP C配合試験体においては、通電遮断直後の電位および復極速度に変化が認められた。すなわち、暴露2年目の夏期に通電遮断直後の電位は卑化し、復極速度が遅い傾向にあった。このような電気化学的特性は水分を多く含んだコンクリートの中の鋼材に電気防食を施した場合に認められるが、本試験の場合は屋外暴露であり原因とは考えがたい。現在までのところ原因は明確になっていないが、アルカリを添加したP C配合試験体のアルカリシリカ反応によるひびわれおよび膨張の挙動を考慮すると、鋼材付近のコンクリートの中で生成したアルカリシリカゲルが鋼材付近への酸素

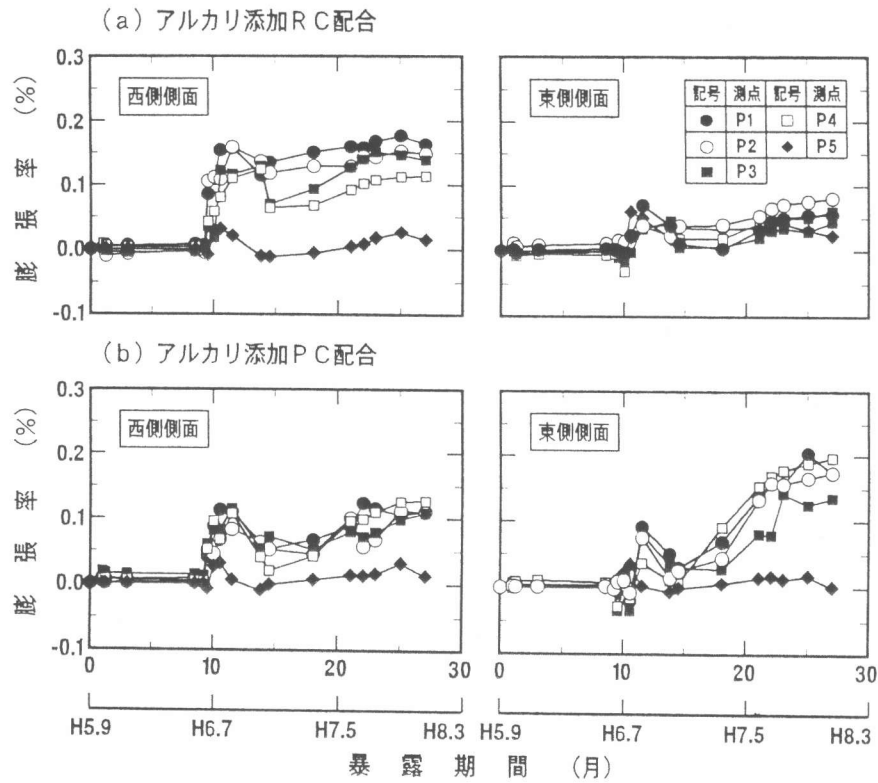


図-6 電流を印加したRC配合試験体およびPC配合試験体のコンクリートの膨張量

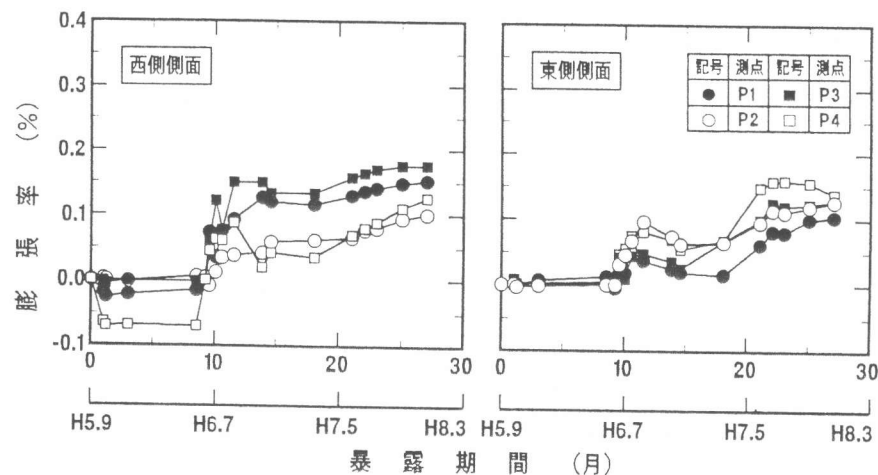


図-7 エポキシ樹脂塗料の塗布とコンクリートの膨張量 (電流を印加したアルカリ添加RC配合試験体)

拡散を妨げたことにより酸素拡散支配による濃度分極が生じたことが原因の一つと考えられる。アルカリシリカ反応過程と電気化学的特性の変化の関連性を把握することにより、電気防食の信頼性のある適用およびアルカリシリカ反応への電気化学的測定による非破壊検査が可能であると考えられる。

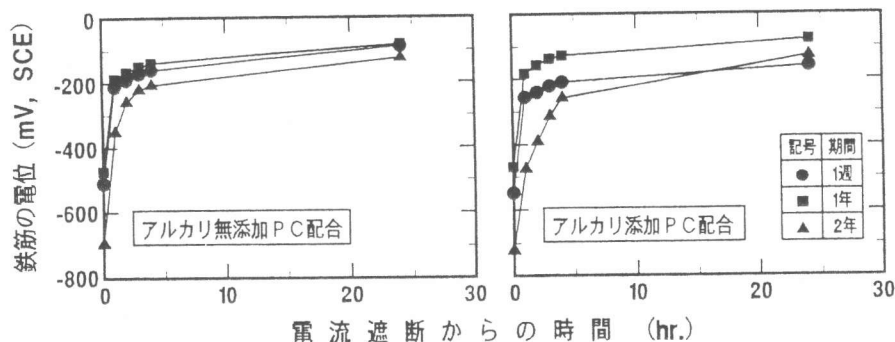


図-8 電流を印加したP C配合試験体の復極試験結果の一例

4. まとめ

本報告は金沢大学工学部屋上での暴露2年までの結果をまとめたものであるが、暴露初期の段階でのコンクリートのひびわれは幅0.05~0.1mmの微細なものが多くひびわれ発生も局部的であるが、アルカリの総量規制値($\text{Na}_2\text{O} = 3 \text{ kg/m}^3$)を大きく下回るRC配合(アルカリ無添加、 $\text{Na}_2\text{O} = 2.3 \text{ kg/m}^3$)試験体に電気防食を施したことによりひびわれが発生したという実験結果は今後橋梁などで電気防食を適用する場合に事前調査として使用されている骨材の反応性の有無を確認することの重要性を示している。屋外暴露環境下でのコンクリート部材のひびわれおよび膨張挙動に関して、季節変動による階段状の膨張挙動、エポキシ樹脂塗装による水分の遮断によるアルカリシリカ反応の抑制効果が認められなかったこと、および、RC配合とPC配合など配合の相違による膨張挙動の相違、など明らかになった。さらに電気化学的特性の変化を把握することによりアルカリシリカ反応の損傷を非破壊的に検査することおよび電気防食の信頼性のある適用の可能性が考えられた。

謝辞

本研究の実施において御協力いただいた(株)ピー・エス 町田 武氏並びに金沢大学大学院西村敏明氏に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Kawamura, M. et al. : Expansion and Cracking due to Alkali-silica Reaction in Concretes under the Two Different Environments, Proc. of the 9th Inter. Conf. on Alkali-aggregate Reaction in Concrete, pp519-528, 1992
- [2] 黒井登起雄 : 電気分解による鉄筋コンクリートの劣化に関する基礎研究、土木学会論文集、第402号、V-10、pp33-42、1989
- [3] Page, C.L. et al. : Development of Alkali-silica Reaction in Reinforced Concrete Subjected to Cathodic Protection, Proc. of the 9th Inter. Conf. on Alkali-aggregate Reaction in Concrete, pp774-781, 1992
- [4] 黒田 保ほか : 電流場におけるアルカリ骨材に関する研究、コンクリート構造物の補修工法と電気防食に関するシンポジウム論文報告集、pp47-52、1994